

鋼繊維補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力式の提案と比較

Proposal and Verification on Predicting Equation of Punching Shear Capacity for SFRC Slabs

東山浩士*, 往田有果理**
Hiroshi Higashiyama, Akari Ota

*博（工），近畿大学准教授，理工学部社会環境工学科（〒577-5802 東大阪市小若江 3-4-1）

** 近畿大学大学院，総合理工学研究科環境系工学専攻（〒577-5802 東大阪市小若江 3-4-1）

In this study, a design equation for the punching shear capacity of steel fiber reinforced concrete (SFRC) slabs is proposed based on the Japan Society of Civil Engineers (JSCE) standard specifications. Twelve SFRC slabs using hooked-ends steel fibers were tested with varying fiber dosage, slab thickness, tensile steel reinforcement ratio, and compressive strength. Calculating results by the design equation are verified with the results of SFRC slabs tested in this study and conducted by earlier researchers. Furthermore, the design equation is compared with other design equations proposed by earlier researchers. Consequently, the proposed design equation can predict the punching shear capacity of SFRC slabs within an applicable accuracy.

Key Words: Steel fiber, RC slab, Punching shear capacity, Fiber pull-out strength

キーワード：鋼繊維，RC 床版，押抜きせん断耐荷力，引抜き強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断破壊はその兆候が見られず，脆性的に生じることが多い．RC 床版の押抜きせん断破壊もそのひとつであり，ひび割れの発生状況からのみでは破壊の兆候を予測することが難しい．このような脆性的に破壊するコンクリートの挙動を改善する方法のひとつとして，コンクリートに繊維を混入した繊維補強コンクリートに関する研究が数多くなされてきた．特に，鋼繊維補強コンクリート(SFRC)については，過去 40 年以上にわたり研究が実施されてきた^{1), 2)}．SFRC 床版について見てみると，1980 年代に実施された Swamy ら³⁾，平澤ら⁴⁾，Narayanan ら⁵⁾の押抜きせん断実験が挙げられる．その後も国内外において SFRC 床版の押抜きせん断実験が数多く実施されてきた^{6)~15)}．

しかし，SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力に関する算定式や設計式が提案された研究は少ない．Narayanan ら⁵⁾は SFRC の割裂引張強度式を提案するとともに，繊維の引抜き強度，ファイバーファクターによる照査断面周長の補正を取り入れた算定式を提案している．Theodorakopoulos ら^{12), 13)}は終局限界状態における床版断面のストレスブロックから求めた中立軸深さを用いた算定式を提案している．また，文献 13)において，中立軸

深さの算出における繰返し計算を簡便化した設計式も提案されている．Choi ら¹⁴⁾は SFRC の破壊基準を適用した理論的な押抜きせん断強度モデルを構築するとともに，それを基にした実用的な算定式を提案している．

本研究では，土木学会コンクリート標準示方書¹⁶⁾の面部材の押抜きせん断耐荷力式を基にした SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式の提案を目的として，12 体の SFRC 床版の押抜きせん断実験を実施した．また，提案した算定式の妥当性を評価するため，既往の研究者らが実施した SFRC 床版の押抜きせん断実験データとの比較および Narayanan ら⁵⁾，Theodorakopoulos ら^{12), 13)}の提案式との比較を行った．

2. コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐荷力式

土木学会コンクリート標準示方書¹⁶⁾の RC 面部材の押抜きせん断耐荷力式を以下に示す．ただし，各種の安全率は除いて検討を進める．

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (1)$$

$$f'_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

表-1 プレーンコンクリートの配合表

Mix No.	Unit weight (kg/m ³)					
	Water	Cement	Fine aggregates		Coarse aggregates	
			Mixed sand	Crushed sand	Crushed gravel	Lime stone
1	183	321	477	317	696	301
2	183	345	466	310	696	301

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d} \quad (3)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p} \quad (4)$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d) \quad (5)$$

ここに、 f'_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 u は載荷面の周長 (mm)、 u_p は照査断面の周長 (mm)で、載荷面から $d/2$ だけ離れた位置で算出するものとする、 d および p は有効高さ (mm)および鉄筋比で、二方向の鉄筋に対する平均値とする。また、 f'_{pcd} は 1.2 N/mm² 以下、 β_d および β_p は 1.5 を越える場合は 1.5 とする。

3. 押抜きせん断実験

3.1 使用材料

本実験では、表-1 に示す 2 種類の配合によるプレーンコンクリート（普通セメント）を使用した。スランプおよび最大粗骨材寸法は 15 cm および 20 mm である。鋼繊維は図-1 に示す、長さ 30 mm、直径 0.62 mm のフックエンド（糊付け）タイプを使用した。また、製造元データから、鋼繊維の 0.2%オフセット降伏強度およびヤング係数は 1119 N/mm²および 184 kN/mm²であった。SFRC は実験室内にてアジテータ車に所定の繊維量を投入し、5 分間高速回転させて作製した。SFRC の打設と同時に、100×100×400 mm の角柱試験体を用いた洗い分析試験により繊維の体積混入率を求めた。体積混入率と床版載荷時の圧縮強度およびヤング係数を表-2 に示す。材料試



図-1 フックエンドタイプ鋼繊維

表-2 SFRC の圧縮強度とヤング係数

Mix No.	Fiber volume fraction (%)	Compressive strength (N/mm ²)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)
1	0.63	27.8	19.2
1	0.67	24.6	22.6
2	0.72	42.4	29.6
2	0.91	21.6	21.4
1	0.94	31.1	24.0
1	1.03	30.4	24.0

験用のテストピースは SFRC 床版と同様に実験室内にて養生を行った。そのため、配合が同じであっても打設時期や実験開始時期の影響による強度の違いが生じている。

3.2 SFRC 床版と実験方法

本実験では、表-3 に示すように、床版厚の異なる 12 体の SFRC 床版を作製した。鉄筋は図-2 に示すように、

表-3 SFRC 床版の諸元

Slabs	Thickness (mm)	Effective depth (mm)	Reinforcement ratio (%)	Fiber volume fraction (%)	Maximum load (kN)
t100-0.67	100	70	0.85	0.67	137.5
t140-0.67	140	110	0.54	0.67	210.2
t180-0.67	180	150	0.40	0.67	297.6
t100-0.72	100	65	0.91	0.72	140.8
t140-0.72	140	105	0.57	0.72	213.2
t180-0.72	180	145	0.41	0.72	290.7
t100-0.91	100	65	0.91	0.91	120.8
t140-0.91	140	105	0.57	0.91	183.1
t180-0.91	180	145	0.41	0.91	231.2
t100-0.63	100	70	0.85	0.63	152.3
t100-0.94	100	70	0.85	0.94	147.9
t100-1.03	100	70	0.85	1.03	158.9

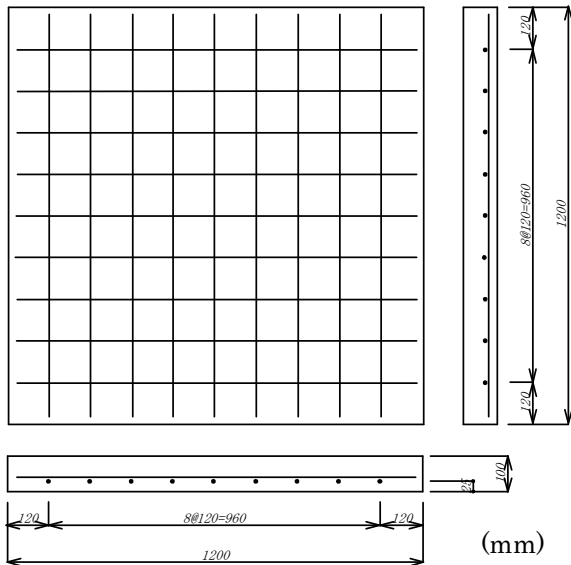


図-2 配筋図の一例 (床版厚 100 mm)

全ての床版において D10 (SD295A) を 120 mm 間隔に引張側のみに配置した。

載荷実験状況を図-3 に示す。全ての床版において支間長 1000 mm の単純支持とし、載荷板には寸法 100×100 mm の鋼板を用いた。なお、支間長が比較的小さいため、床版隅角部の浮き上がり防止装置は設置していない。

計測項目は荷重、床版中央変位、支持線上の変位であ

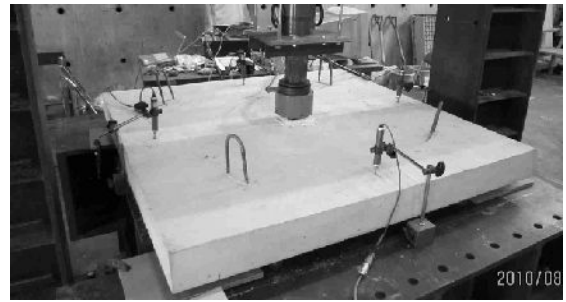
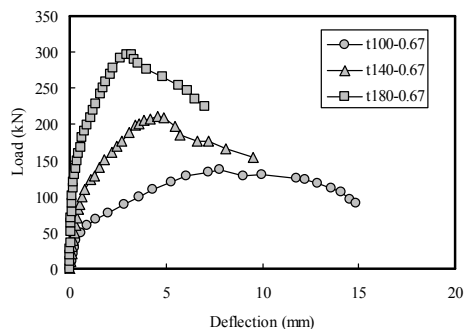


図-3 押抜きせん断実験状況

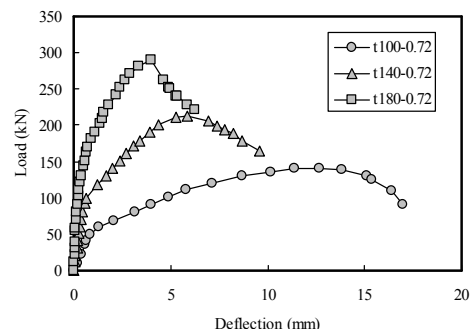
る。また、床版内のせん断ひび割れ発生状況を確認するため、実験後に床版厚 180 mm の試験体(t180-0.72, t180-0.91)のみ床版中央を十字に切断した。

3.3 実験結果

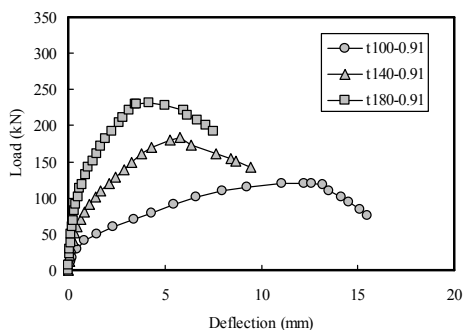
最大荷重を表-3 に示す。全ての試験体が最終的に押抜きせん断破壊を呈した。また、各試験体の荷重-たわみ関係を図-4 に示す。SFRC 床版は RC 床版に比べて最大荷重以降の荷重低下が緩やかである。また、図-4 (a)～(c)に示すように、床版厚 100 mm の試験体に比べて、床版厚 140 mm, 180 mm の最大荷重はそれぞれ約 1.5 倍, 2.0 倍に増加しており、押抜きせん断耐荷力に及ぼす床版厚の影響は大きい。一方、図-4 (d)に示すように、圧縮強度の違いはあるものの、繊維混入率の異なる床版厚 100 mm の試験体の最大荷重は繊維混入率に比例して増



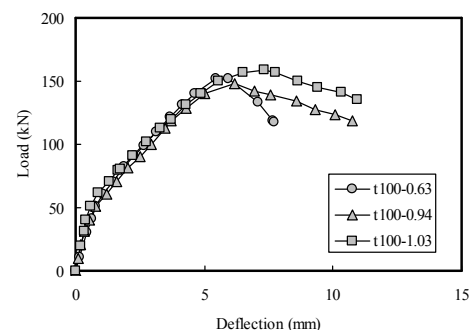
(a) 繊維混入率 0.67%



(b) 繊維混入率 0.72%



(c) 繊維混入率 0.91%

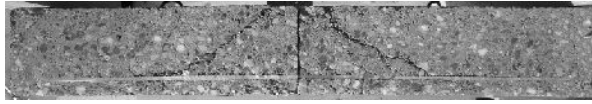


(d) 床版厚 100 mm

図-4 荷重-たわみ関係



(a) t180-0.72 床版



(b) t180-0.91 床版

図一5 実験後のせん断ひび割れ

加していない。このような傾向は既往の研究¹⁷⁾においても確認されており、繊維混入率が小さい範囲において耐荷力は比例的に増加するものの、繊維混入率が大きくなると増加傾向は鈍化する。これは繊維の配向や引抜き強度の低下などが原因であると考えられる。

次に、実験後に切断した床版厚 180 mm の試験体を図一5に示す。Narayanan ら⁵⁾は載荷試験後に繊維混入率の異なる 10 体の SFRC 床版のせん断ひび割れを観察し、式(6)に示すファイバーファクターの増大によりせん断ひび割れの角度が大きくなる、すなわち、床版中央からせん断ひび割れまでの距離が短くなることを明らかにしている。

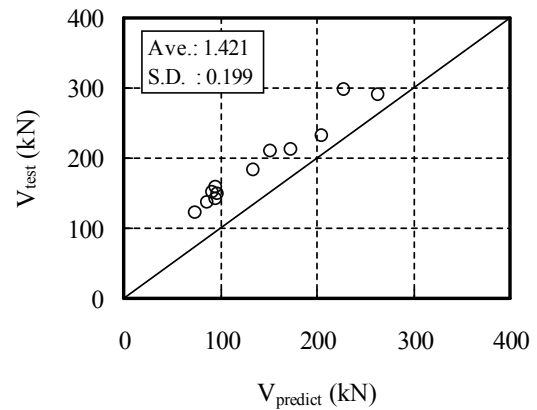
$$F = \eta \frac{l_f}{d_f} V_f \quad (6)$$

ここに、 η は繊維の種類による係数（フックエンド鋼繊維は 1.0）、 l_f は繊維長さ、 d_f は繊維径、 V_f は繊維混入率である。

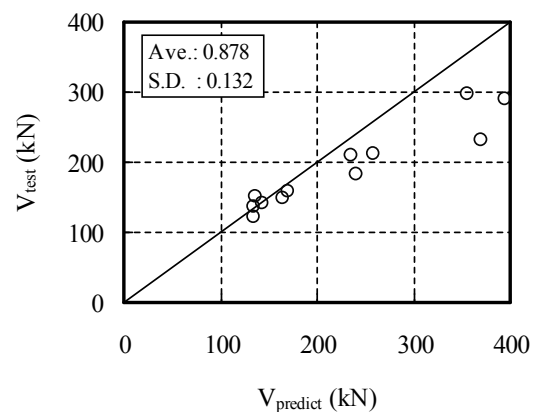
本実験においても、この傾向を確認するために切断した断面における床版中央からせん断ひび割れまでの水平距離を測定した。その結果、床版上面から $d/2$ だけ下方に離れた位置における水平距離は、コンクリート標準示方書の照査断面位置との比較から、t180-0.72 床版ではほぼ同じであり、t180-0.91 床版では 86% に低下していた。本実験では、計測した試験体が 2 体であったため、Narayanan ら⁵⁾の実験結果との整合性を見出すことはできなかった。しかし、後述するように、SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力はファイバーファクターと強い相関を有している。

3.4 押抜きせん断耐荷力式

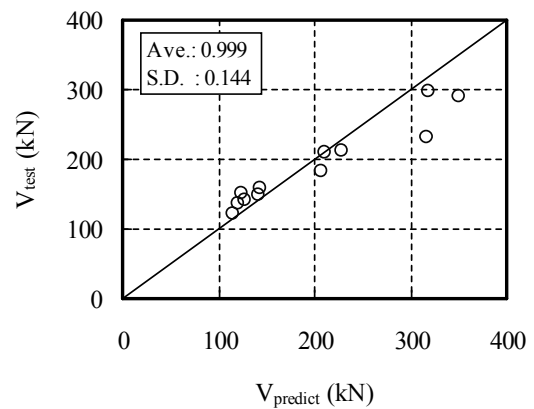
ここで、式(1)～(5)に示したコンクリート標準示方書の押抜きせん断耐荷力式を基にした SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式を検討する。まず、本実験結果である 12 体の SFRC 床版に対して、式(1)～(5)から算出した耐荷力（計算結果 1）を図一6 (a)に示す。その結果、算定精度は平均値 1.421、標準偏差 0.199 であり、当然のことながら過小評価することになる。次に、次式に示す繊維の引抜き強度を式(1)に導入して算出した耐荷力（計算結果 2）を図一6 (b)に示す。その結果、算定精度は平均値 0.878、



(a) 計算結果 1



(b) 計算結果 2



(c) 計算結果 3

図一6 耐荷力算定結果

標準偏差 0.132 であり、過大評価することになる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot (f'_{pcd} + f_b) \cdot u_p \cdot d \quad (7)$$

$$f_b = 0.41\tau F \quad (8)$$

ここに、 τ は繊維の引抜き強度（ $= 4.15 \text{ N/mm}^2$ ¹⁸⁾）である。

繊維の引抜き強度はコンクリート強度に依存すると

表-4 SFRC 床版の押抜きせん断実験データ

Reference No.	No. of slabs	Thickness (mm)	Effective depth (mm)	Reinforcement ratio (%)	Fiber volume fraction (%)	Length of loading pad (mm)	Compressive strength (N/mm ²)
Authors	12	100~180	65~150	0.41~0.91	0.67~1.03	100	21.6~42.4
Ref. 3)	8	125	100	0.56	0.6~1.2	150	39.1~44.0
Ref. 4)	12	100	75	0.67~0.95	1.0~2.0	120	50.3~60.8
Ref. 5)	11	60	45	2.01~2.69	0.5~1.25	100	31.6~56.4
Ref. 8)	8	82.55	60	1.56	0.61~1.93	63.5	22.1~46.8
Ref. 9)	8	55, 75	39, 55	1.12	0.45~2.0	100	20.0~31.8
Ref. 11)	3	70	58	1.37	0.5~1.5	60	48.5~49.2
Ref. 15)	8	152	127	0.56, 0.83	1.0, 1.5	152	25.4~59.3

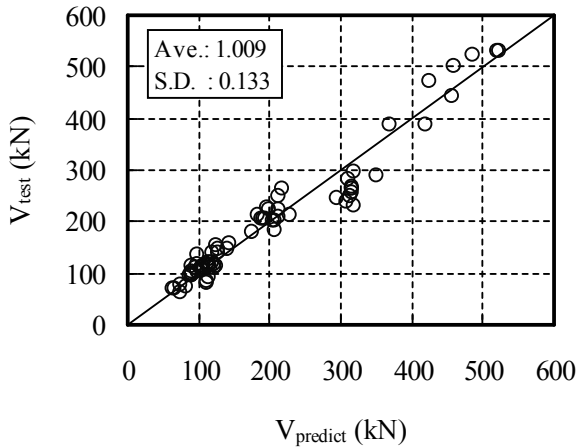


図-7 本提案式による算定結果

考えられるが、この関係を調べた研究は少ない。そこで、Voo & Foster¹⁹⁾の式を用いて引抜き強度を考慮した計算を再度行なったが、算定精度の向上は見られなかった。よって、これについては今後の課題であるが、本研究の範囲において実験で使用したコンクリート強度であれば算定精度に影響しないとして引抜き強度を 4.15 N/mm²の一定値とした。さらに、SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力がファイバーファクターと相関を有しているという Narayanan ら⁵⁾の実験結果と同様に、 $d/2$ だけ離れた位置における照査断面の周長を次式のように補正することにした。

$$u_p = (u + \pi d)(1 - KF) \quad (9)$$

式中の係数 K を実験結果との比較により 0.32 として算出した耐荷力 (計算結果 3) を図-6 (c) に示す。その結果、算定精度は平均値 0.999、標準偏差 0.144 となり、実験結果を概ね推定できる。

4. 算定式の妥当性評価

4.1 既往の実験データとの比較

本研究で提案した SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式の妥当性を評価するため、本実験結果に加えて、既往の研究者ら^{3)~5), 8), 9), 11), 15)}が実施した SFRC 床版の押抜きせん断実験データ 58 体 (表-4) との比較を行った。こ

表-5 算定精度の比較

Predicting equation	No. of slabs	Ave.	S.D.	Correlation Coef.
Narayanan and Darwish	70	0.981	0.196	0.896
Authors		1.009	0.133	0.972
Theodorakopoulos and Swamy	59	1.139	0.168	0.967
Authors		0.990	0.125	0.970

れらの SFRC に使用された鋼繊維のタイプは、プレーン、フックエンド、クリンプ、インデント、ツイスト、波型である。詳細はそれぞれの文献を参照されたい。ここで、文献の中にはコンクリートの圧縮強度試験に立方供試体が用いられているものがあったため、その場合には円柱供試体の圧縮強度への換算として 0.8 倍とした。図-7 に示すように、70 体のデータに対する算定精度は平均値 1.009、標準偏差 0.133 となり、上述した本実験結果に対する算定精度とほぼ同じ結果が得られた。

4.2 既往の算定式との比較

次に、既往の算定式との比較により、本提案式の算定精度を評価する。既往の算定式である、Narayanan ら⁵⁾、Theodorakopoulos ら^{12), 13)}の式により表-4 に示した実験データに対して比較を試みた。ただし、Theodorakopoulos ら^{12), 13)}の算定式には鉄筋の降伏強度が必要であるが、文献に記載されていないものもあったことから、算定において必要なデータが得られなかった試験体については除外した。それぞれの算定式を以下に示す。

Narayanan ら⁵⁾の算定式

$$V_u = \xi_s (0.24 f_{spf} + 16 \rho + v_b) b_{pf} d \quad (10)$$

$$f_{spf} = f_{cu} / (20 - \sqrt{F}) + 0.7 + \sqrt{F} \quad (11)$$

$$v_b = 0.41 \tau F \quad (12)$$

$$b_{pf} = (b_0 + 3\pi h)(1 - KF) \quad (13)$$

$$\xi_s = 1.6 - 0.002h \quad (14)$$

ここに、 f_{cu} は繊維補強コンクリートの圧縮強度 (立方体)、 f_{spf} は繊維補強コンクリートの割裂強度、 ρ は引張鉄筋比、 τ は繊維の引抜き強度 (= 4.15 N/mm²)、 b_0 は載荷面の周長、 h は床版厚、 K は係数 (= 0.55) である。

Theodorakopoulos ら^{12), 13)}の算定式

$$V_{uf} = m \left[0.234 f_{cu}^{2/3} (4r + 12d) \frac{\alpha\lambda + \beta}{1 + \alpha\lambda + 1.25\beta} d (100/d)^{1/6} \right] + 2\sigma_{cu} \left[r + 0.866 \frac{\alpha\lambda + \beta}{1 + \alpha\lambda + 1.25\beta} d \right] \frac{\alpha\lambda + \beta}{1 + \alpha\lambda + 1.25\beta} d \quad (14)$$

$$\sigma_{cu} = \eta_o \eta_b \left(\frac{l_f}{d_f} \right) V_f (m\tau) \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\rho f_y}{0.145 f_{cu}} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{\sigma_{cu}}{0.145 f_{cu}} \quad (17)$$

ここに、 m はコンクリートの種類に関する係数、 f_{cu} は繊維補強コンクリートの圧縮強度（立方体）、 σ_{cu} は繊維の引抜き強度、 f_y は鉄筋の降伏強度、 r は載荷面の辺長、 η_o は繊維の配向係数（= 0.41）、 η_b は繊維の付着効果に関する係数、 V_f は繊維の体積混入率、 τ は繊維の引抜き強度（= 4.15 N/mm²）、 ρ は引張鉄筋比、 λ は α の値に応じた係数である。

上記 2 つの算定式および本提案式の算定精度を表一5に示す。既往の算定式と比較して本提案式の精度は良い結果を与えることが分かった。ただし、現状での本提案式の適用範囲は既往の実験データの範囲内とする。

5. まとめ

本研究では、コンクリート標準示方書式を基にして SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力式を提案した。提案式と既往の実験結果、あるいは既往の算定式との比較から、提案式は精度良く押抜きせん断耐荷力を推定できた。今後は、実物大の SFRC 床版について FEM による解析を実施し、その結果と提案式との比較を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Romualdi, J.P. and Baston, G.B.: Mechanics of crack arrest in concrete, Proc. of ASCE, Vol.83, No. EM3, pp.147-169, 1963.
- 2) Romualdi, J.P. and Mandel J.A.: Tensile strength of concrete affected uniformly distributed and closely short lengths of wire reinforcement, ACI Journal, Vol.61, pp.657-671, 1964.
- 3) Swamy, R.N. and Ali, S.A.R.: Punching shear behavior of reinforced slab-column connections made with steel fiber concrete, ACI Journal, Vol.79, pp.392-406, 1982.
- 4) 平澤征夫, 伊藤和幸, 高木克則: 鋼繊維補強鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断強度, 土木学会第 37 回年次学術講演会概要集, V-124, pp.247-248, 1982.
- 5) Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S.: Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs, Magazine of Concrete Research, Vol.39, No.138, pp.42-50, 1987.
- 6) Alexander, S.D.B. and Simmonds, S.H.: Punching shear tests of concrete slab-column joints containing fiber reinforcement, ACI Structural Journal, Vol.89, No.4, pp.425-432, 1992.
- 7) Tan, K.H. and Paramasivam, P.: Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete slabs, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.6, No.2, pp.240-253, 1994.
- 8) Shaaban, A.M. and Gesund, H.: Punching shear strength of steel fiber reinforced concrete flat plates, ACI Structural Journal, Vol.91, No.3, pp.406-414, 1994.
- 9) Harajli, M.H. Maalouf, D., and Khatib, H.: Effect of fibers on the punching shear strength slab-column connections, Cement & Concrete Composites, Vol.17, pp.161-170, 1995.
- 10) di Prisco, M. and Felicetti, R.: Some results on punching shear in plain and fibre-reinforced micro- concrete slabs, Magazine of Concrete Research, Vol.49, No.180, pp.201-219, 1997.
- 11) 若林 学, 丸山武彦: 鋼繊維補強による RC 床版の押抜きせん断耐力に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, V-131, pp.261-262, 2002.
- 12) Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N.: Ultimate punching shear strength analysis of slab-column connections with steel fibers, ACI SP-182-11, pp.181-214, 1999.
- 13) Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N.: Design method for punching shear strength of steel fiber reinforced concrete slabs, Innovation in Fiber-Reinforced Concrete for Values, ACI SP-216, pp.181-212, 2003.
- 14) Choi, K.K., Taha, M.M.R., Park, H.G., and Maji, A.K.: Punching shear strength of interior concrete slab-column connections reinforced with steel fibers, Cement & Concrete Composites, Vol.29, pp.409-420, 2007.
- 15) Cheng, M.Y. and Parra-Montesinos, G.J.: Evaluation of steel fiber reinforcement for punching shear resistance in slab-column connections part I: Monotonically increased load, ACI Structural Journal, Vol.107, No.1, pp.101-109, 2010.
- 16) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編 2007 年制定, pp.141-144, 2008.
- 17) Mindess, S., Adebr, P., and Henley, J.: Testing of fiber-reinforced structural concrete elements, Proceedings of ACI International Conference on High-Performance Concrete: Design and Materials and Recent Advantages in Concrete Technology, ACI SP-172, pp.495-515, 1997.
- 18) Narayanan, R. and Kareem-Palanjian, A.S.: Effect of fibre addition on concrete strengths, Indian Concrete Journal, Vol.58, No.4, pp.100-103, 1984.
- 19) Voo, J.Y.L. and Foster, S.J.: Variable engagement model for fibre reinforced concrete in tension, Uniciv Report No.R-420, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, pp.86, 2003.